第 38 卷第 7 期 2018 年 4 月 | 生　态　学　报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.38,No.7 Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201705150893

王雪,郭雪莲,郑荣波,王山峰,刘双圆,田伟.放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响.生态学报,2018,38(7):2308-2314.
Wang X,Guo X L,Zheng R B,Wang S F,Liu S Y,Tian W.Effects of grazing on nitrogen transformation in swamp meadow wetland soils in Napahai of Northwest Yunnan.Acta Ecologica Sinica,2018,38(7):2308-2314.

放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响

王　雪[1],郭雪莲[1,*],郑荣波[2],王山峰[1],刘双圆[1],田　伟[3]

1 西南林业大学国家高原湿地研究中心,昆明　650224
2 西南林业大学化学工程学院,昆明　650224
3 云南香格里拉市纳帕海湿地管理局,迪庆　674400

摘要:选择位于滇西北高原纳帕海国际重要湿地内的典型沼泽化草甸湿地为研究对象,采用原位土柱室内控制实验法研究了放牧干扰(猪翻拱扰动和牲畜践踏)对沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响。研究结果表明,放牧活动显著提高了沼泽化草甸湿地表层土壤的容重和 pH 值,降低了土壤含水率、TOC、TN 和 NH_4^+-N 含量,而对 NO_3^--N 含量影响不显著。放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤的矿化速率和硝化速率均表现为猪翻拱扰动样地(ZG)>牲畜践踏样地(JT)>对照样地(CK);表现为 ZG>JT>CK。放牧干扰促进了沼泽化草甸湿地土壤的矿化和硝化作用,猪的翻拱活动比牲畜践踏活动对土壤氮矿化和硝化作用的促进作用更显著。放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤的反硝化速率表现为 ZG>CK>JT,猪的翻拱活动促进了土壤 N_2O 气体的排放,而牲畜践踏活动抑制了土壤 N_2O 气体的排放。相关性分析表明,受放牧干扰的沼泽化草甸湿地土壤的矿化和硝化速率均与土壤容重、pH 呈显著正相关,与土壤含水率、NH_4^+-N、TOC、TN 含量呈显著负相关;反硝化速率与 TOC 含量呈显著负相关。

关键词:纳帕海;放牧干扰;矿化作用;硝化作用;反硝化作用

Effects of grazing on nitrogen transformation in swamp meadow wetland soils in Napahai of Northwest Yunnan

WANG Xue[1],GUO Xuelian[1,*],ZHENG Rongbo[2],WANG Shanfeng[1],LIU Shuangyuan[1],TIAN Wei[3]

1 *National Plateau Wetland Research Center, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*
2 *Faculty of Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*
3 *Napa Lake Wetland Management Bureau in Shangri-La City, Diqing* 674400, *China*

Abstract: In this study, the typical swamp meadow wetland in Napahai, a Wetland of International Importance, in Northwest Yunnan was selected as the research site. Nitrogen transformations in swamp meadow wetland soils under the influence of grazing disturbance were measured and analyzed using in situ column interior control experiment methods. The results showed that the soil bulk density and pH were increased, and the soil moisture content, total organic carbon content, total nitrogen content, and NH_4^+-N content were decreased in surface soils with grazing disturbance. The mineralization and nitrification rates of swamp meadow wetland soils with the influence of grazing disturbance showed a significant decrease: pig arch > cattle-trampled > control. Both pig arch and cattle-trampled sites enhanced the mineralization and nitrification rates. Denitrification rates of swamp meadow wetland soils with the influence of grazing disturbance showed a significant decrease: pig arch > control > cattle-trampled ($P<0.05$). Pig arch sites promoted N_2O release but cattle-trampled sites

基金项目:国家自然科学基金项目(41563008, 41001332);云南纳帕海国际重要湿地 2015 年生态效益补偿试点项目

收稿日期:2017-05-15;　　**网络出版日期**:2018-01-04

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: guoxuelian2009@hotmail.com

inhibited N_2O release. In contrast, both the mineralization and nitrification rates of swamp meadow wetland soils with the grazing disturbance had a significant positive correlation with soil bulk density and pH, and a significant negative correlation with soil moisture content, NH_4^+-N content, TOC, and TN. Denitrification rate had a significant negative correlation with TOC.

Key Words: Napahai; grazing disturbance; mineralization; nitrification; denitrification

氮素是湿地生态系统植物光合作用和初级生产过程中最受限制的元素之一[1]。土壤中的氮素大部分以有机氮形式存在,无机氮(主要为氨态氮和硝态氮)仅占土壤全氮的1%左右[2]。由于植物可直接吸收利用的氮素形态为无机氮,所以氮的矿化和固持两个同时进行的过程在很大程度上决定着土壤有效氮的供给,进而影响着湿地生态系统的初级生产力[3]。硝化作用是影响土壤有效氮供给的重要因素,硝化作用的产物 NO_3^--N 极易淋失或作为电子受体经反硝化作用发生气态损失,这个过程的产物 N_2O[4]是三大温室气体之一,其增温潜势在100年时间尺度上是 CO_2的大约298倍[5],与全球气候问题息息相关。所以研究湿地土壤氮素的迁移转化过程,对湿地生态系统初级生产力和全球气候变化研究均具有重要意义。

滇西北是云南高原湿地的集中分布区,地处少数民族聚集的农牧交错带,当地对于湿地资源利用的主要途径是放牧。纳帕海是滇西北高原典型沼泽化草甸湿地集中分布区,同时也是受放牧干扰最为典型和严重的区域。放牧类型主要为牦牛放牧和藏香猪放养。放牧过程中动物践踏、翻拱扰动会不同程度的影响湿地植被[6]、土壤的理化性质[7]及碳氮空间分布规律[8],进而对湿地土壤氮的迁移转化过程产生影响[9-10]。然而,关于放牧干扰对滇西北高原沼泽化草甸湿地土壤氮的迁移转化的影响规律尚不清楚。因此,本研究选取纳帕海沼泽草甸湿地为研究区,采用野外采样和室内培养分析相结合的方法,对比研究不同放牧干扰(牲畜践踏和猪翻拱活动)对沼泽化草甸湿地土壤理化性质、矿化作用、硝化作用和反硝化作用的影响,阐明放牧过程中动物活动对沼泽化草甸湿地土壤氮迁移转化的影响及规律,为放牧对湿地生态系统干扰研究提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地位于滇西北高原的纳帕海国际重要湿地(99°37′10.6″—99°40′20.0″ E,27°48′55.6″—27°54′28.0″ N)内,行政上隶属云南省迪庆藏族自治州香格里拉市,距市区 8km,平均海拔 3260m。纳帕海发育在石灰岩母质的中甸高原上,受喀斯特作用的强烈影响,湖盆底部被蚀穿而形成落水洞,湖水在地下汇集后从北部穿过小背斜出露形成支流汇入金沙江。湖盆四周山岭环绕,从湖盆中心至湖岸生长着大量的水生和陆生植被,湖滨有较大面积的沼泽化草甸,周围山上生长着硬叶常绿阔叶林和云杉冷杉针叶林以及灌丛。水量补给主要依靠降雨、冰雪融水和湖东南侧几条短小河流,以及湖西侧沿金沙江一中甸断裂带上涌的泉水[11]。纳帕海湿地地处青藏高原与亚热带季风气候区和中南半岛热带季风区的结合部,具有高寒、年均温低、霜期长、气温年较差和日较差大、干湿季节分明等特点。年均温为 5.4℃,年降水量为 619.9mm,主要集中在 6—8 月[12]。

依据典型性和代表性原则,在纳帕海国际重要湿地内选取典型沼泽化草甸湿地作为研究区。研究区内主要物种有早熟禾(*Poa annua*)(约 30%)、小苔草(*Carex parva*)(约 5%—10%)、云雾苔草(*Carex nubigena*)(约 5%—20%,随水深增加而增加)、木里苔草(*Carex muliensis*)(投影盖度在群落中约 5%—60%)、单鳞苞荸荠 *Eleocharis uniglumis*(5%—100%)、嵩草 *Kobresia bellardii*(5%—20%,少数水边环境可形成宽约 30cm 的纯群)等。地表季节性积水,土壤为草甸沼泽土,发育明显的泥炭层和潜育层。

1.2　研究方法

研究区位于纳帕海国际重要湿地纳帕村附近,在纳帕海村环湖路以西的围栏禁牧区设置对照样地(CK),在纳帕海村环湖路以东,根据地表植被和土壤物理状况设置猪翻拱扰动样地(ZG)、牲畜践踏样地(JT)

(图 1)。样地大小为 10m×10m,沿对角线选 3 个取样点,每个取样点用 PVC 管(内径 10cm,长 30cm)取 0—10cm 土柱 2 个(分别用于矿化/硝化和反硝化实验),共取土柱 18 个。取土柱前去除地上植被,用塑料薄膜封住 PVC 管上下口带回实验室。同时用自封袋取 0—10cm 土样带回实验室用于土壤理化性质的测定。将取回的原位土柱打开上口,25℃下恒温箱内预培养 24h[13]。

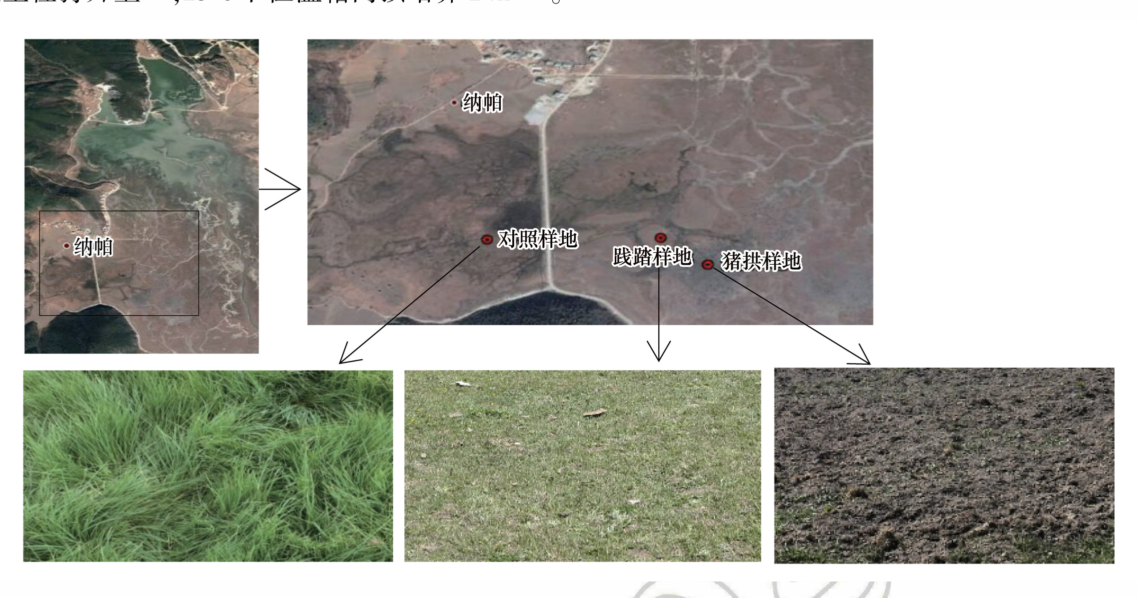


图 1 实验样地

Fig.1 Experimental plots

矿化/硝化作用:在预培养后的土柱内取少量土样用于土壤氨氮、硝氮初始含量的测定;然后,将预培养的土柱重新封住上口,25℃下恒温箱内培养 30d,打开土柱封口取土样测定土壤氨氮、硝氮的含量,计算矿化量、矿化速率和硝化量、硝化速率。

反硝化作用:采用乙炔抑制法[14]。将预培养后的土柱重新封住上口,用注射器抽取顶部 10%的气体置换成乙炔气体(V/V)。注射乙炔气体后的土柱在黑暗环境下 25℃培养 24h,抽取 150mL 气体,用超痕量温室气体分析仪(N_2O/CO LOS GATOS RESEARCH)(仪器属于西南林业大学大型仪器共享平台)测定 N_2O 浓度,计算反硝化速率。

反硝化速率(mg m^{-2} d^{-1}) $= 44/22.4 \times M \times 273/(273+T) \times (V1-V2)/S$

式中,M 为气体浓度 ppm,T 为培养温度,$V1$、$V2$ 分别为 PVC 管和土壤有效体积,S 为土柱面积,$d=1$ 为天数

土壤含水率的测定采用烘干法,土壤容重的测定采用环刀法,土壤 pH 值采用土壤原位 pH 计测定,土壤总氮(TN)采用分光光度计测定,土壤总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪测定,土壤氨态氮、硝态氮含量采用 1mol/L 的 KCL 溶液浸提(土水比 1:10)后提取上清液用连续流动分析仪(SKALAR San++, Skalar Co., Netherlands)(仪器属于西南林业大学大型仪器共享平台)测定[15]。

1.3 数据统计

实验数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件,采用单因素方差分析法分析放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤理化性质间的差异性以及矿化速率、硝化速率和反硝化速率间的差异性。采用 Pearson 相关系数法分析放牧干扰下沼泽化草甸湿地氮转化与土壤环境的关系,以 $P<0.05$ 位差异显著。图件制作采用 SigmaPlot 10.0 软件。

2 结果与分析

2.1 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤理化性质的影响

放牧干扰在一定程度上影响了沼泽化草甸湿地土壤的理化性质(表 1)。CK 地土壤的容重仅为 0.2g/cm^3,而 ZG 和 JT 地的容重达到 0.60g/cm^3和 0.62g/cm^3,放牧活动显著提高了沼泽化草甸湿地土壤的容重($P<$

0.01);DZ 地土壤的含水率高达 66.31%,而 ZG 和 JT 地土壤的含水率分别为 43.82%和 43.34%左右,放牧干扰使沼泽化草甸土壤含水率显著下降($P<0.01$);CK 地土壤 pH<7,呈酸性,ZG 和 JT 地土壤 pH>7,呈碱性,放牧活动使得沼泽化草甸湿地土壤 pH 增大;放牧干扰下土壤 TOC 含量表现为 CK>JT>ZG($P<0.01$), TN、TP、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量均表现为 CK>ZG>JT。放牧活动显著降低了沼泽化草甸湿地土壤表层的 TN、TP、NH_4^+-N 含量($P<0.01$),而对 NO_3^--N 含量影响不显著($P>0.05$)。

表 1 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤理化性质的影响

Table 1 The physicochemical properties of swamp meadow wetland soil with influence of grazing disturbance

样地 Plots	容重 Bulk density/ (g/cm^3)	含水率 Moisture content/%	pH	总有机碳 TOC/ (g/kg)	总氮 TN/ (g/kg)	总磷 TP/ (g/kg)	氨态氮 NH_4^+-N/ (mg/L)	硝态氮 NO_3^--N/ (mg/L)
ZG	0.60(0.11)b	43.82(5.95)b	7.43(0.14)b	70.94(19.41)c	13.00(3.02)b	1.69(0.05)b	3.29(0.09)b	2.34(0.99)a
JT	0.62(0.10)a	43.34(4.88)c	7.65(0.21)a	111.63(11.31)b	11.13(3.31)c	1.18(0.04)c	2.89(0.44)c	1.24(0.58)a
CK	0.21(0.03)c	66.31(3.42)a	6.75(0.28)c	142.58(40.56)a	22.67(3.35)a	1.74(0.02)a	4.88(0.11)a	1.78(0.33)a

括号内数值为标准差;同列内含有不同上标字母表示差异显著($P<0.05$); ZG:猪翻拱扰动样地,pig arch;JT:牲畜践踏样地,cattle-trampled;CK:对照样地,control

2.2 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤氮矿化和硝化特征的影响

放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤氮矿化和硝化作用的影响如表 2 所示。放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤氮矿化量和矿化速率均为负值,说明 ZG、JT 和 CK 地土壤微生物的固持作用均高于矿化作用,固持作用占据主导地位。可能是由于实验期为植物生长旺季,植物大量吸收无机氮而使土壤表现为氮素固持状态。放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤氮矿化量和矿化速率均均表现为 ZG>JT>CK($P>0.05$)。说明猪的翻拱活动比牲畜践踏活动对土壤氮矿化作用的促进作用更显著。放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤净氨化量和净氨化速率均表现为 JT>CK>ZG($P>0.05$)。说明牲畜践踏活动促进了土壤氨化作用,而猪的翻拱活动抑制了土壤氨化作用。放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤净硝化量和净硝化速率均表现为 ZG>JT>CK($P<0.01$)。说明猪的翻拱活动比牲畜践踏活动对土壤硝化作用的促进作用更显著。ZG 和 JT 地土壤的硝化量和硝化速率均为正值,说明其硝化作用产生的 NO_3-N 被微生物固持后有较多剩余,而 CK 地硝化作用产生的 NO_3-N 被微生物固持后没有剩余。

表 2 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤氮矿化和硝化特征的影响

Table 2 The nitrogen mineralization and nitrification feature of swamp meadow wetland soil with influence of grazing disturbance

项目 Item	ZG	JT	CK
净氮矿化量 Net nitrogen mineralization amount/(mg/L)	−0.584(0.51)a	−0.675(1.03)a	−2.647(0.60)a
净氮矿化速率 Net nitrogen mineralization rate/(mg L^{-1} d^{-1})	−0.020(0.02)a	−0.023(0.03)a	−0.088(0.02)a
净氨化量 Net ammonification amount/(mg/L)	−1.690(0.32)a	−1.479(0.42)a	−1.517(0.39)a
净氨化速率 Net ammonification rate/(mg L^{-1} d^{-1})	−0.056(0.01)a	−0.049(0.01)a	−0.051(0.01)a
净硝化量 Net nitrification amount/(mg/L)	1.106(0.34)a	0.803(0.61)b	−1.130(0.27)c
净硝化速率 Net nitrification rate/(mg L^{-1} d^{-1})	0.037(0.01)a	0.027(0.02)b	−0.038(0.01)c

括号内的数值为标准差;同行内含有不同上标字母表示差异显著($P<0.05$)

土壤的净矿化/硝化作用通常用于指示土壤氮的有效性,净矿化量高说明土壤氮的有效性高,同时,硝化作用的产物 NO_3^--N 易淋失或经反硝化作用发生气态损失,所以净硝化量越大,氮损失的可能性就越大。ZG 和 JT 地土壤的矿化量和硝化量均高于 CK 地,说明放牧活动会在一定程度上造成沼泽化草甸湿地土壤的氮损失。

2.3 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤氮反硝化特征的影响

放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤反硝化速率的影响如图 2 所示。ZG、JT 和 CK 地土壤的平均反硝化速率分别为(8.42±3.38)、(1.79±0.25) mg m^{-2} d^{-1}和(2.35±0.66) mg m^{-2} d^{-1},表现为 ZG>CK>JT。ZG 地土壤的

平均反硝化速率分别为 JT 地和 CK 地土壤平均反硝化速率的 4.7 倍和 3.6 倍($P<0.05$)。表明猪翻拱活动促进了土壤 N_2O 气体的释放,而牲畜践踏活动抑制了土壤 N_2O 气体的排放。

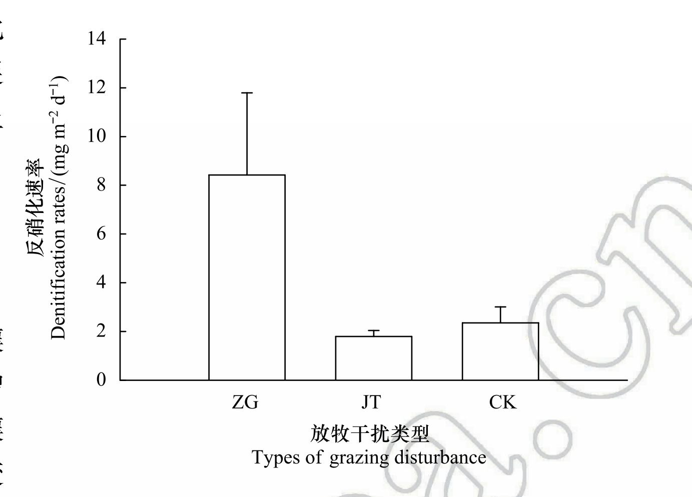


图 2 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤反硝化速率的影响

Fig.2 The denitrification rate of swamp meadow wetland soil with influence of grazing disturbance

ZG:猪翻拱扰动样地,pig arch;JT:牲畜践踏样地,cattle-trampled;CK:对照样地,control

3 讨论

3.1 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤理化性质的影响

放牧干扰不同程度的影响着沼泽化草甸湿地土壤的理化性质,牲畜践踏和猪翻拱活动导致土壤容重增大,土壤含水率降低。这主要是由于牲畜践踏引起土壤空间结构的变化,导致土壤总孔隙度的减少使得土壤变得紧实,从而加大了土壤的容重[16],降低土壤水分含量。猪翻拱活动使沼泽化草甸土壤下层被翻拱裸露,下层比表层土壤容重大,因此测定的猪翻拱区比对照区表层土壤容重大。同时由于猪的翻拱活动,利于土壤水分蒸发,从而导致猪翻拱区土壤含水率下降[17]。

放牧干扰使得沼泽化草甸湿地土壤 pH 增大,呈碱性。是由于放牧活动通过影响土壤水分及土壤可溶性盐类的迁移、转化,使得放牧地土壤中部分的可溶性盐类累积在土壤表层从而提高了放牧地表层土壤的 pH 值。此外,牲畜排泄物的输入也会导致土壤 pH 值增大[18]。

放牧干扰降低了沼泽化草甸湿地土壤表层的 TOC、TN、TP 含量。一方面,与牲畜践踏和猪翻拱活动降低了沼泽化草甸的初级生产力,进而减少有机质向土壤的输入有关[19-20];另一方面,践踏和翻拱有利于植物枯落物的物理破碎,使之与表层土壤更好的搅拌融合,进而提高植物凋落物分解速率和碳周转速率[21]。猪翻拱区比牲畜践踏区土壤表层 TN、TP、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量高。践踏可大幅度降低植物地上生物量,减少向土壤的归还,使得 TN、TP 含量相对较低。践踏增加土壤紧实度和容重,使得土壤有机质矿化作用减弱,NH_4^+-N、NO_3^--N 含量较低[22]。而猪翻拱使得地表植物根系裸露死亡,短期内增加有机质分解归还,TN、TP 含量较高,长期作用结果将加剧土壤养分衰竭退化。说明放牧大大减小了沼泽化草甸湿地的碳储量,降低了湿地发挥氮库的功能[23]。

3.2 放牧干扰对沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响

放牧干扰促进了沼泽化草甸湿地土壤氮矿化和硝化作用,猪翻拱活动比牲畜践踏活动对土壤氮矿化和硝化作用的促进作用更显著。如表 3,土壤氮矿化速率和硝化速率均与土壤容重呈极显著正相关,而均与含水率呈极显著负相关。表明放牧促进土壤氮矿化和硝化作用是由于放牧活动改变了土壤容重和含水率,从而改变土壤的透气性[24-25],利于土壤氮的矿化和硝化的进行。猪翻拱活动比牲畜践踏活动用使得土壤更加松散透气,从而更有利于土壤矿化和硝化作用的进行;而对照地土壤的含水率高,处于厌氧还原状态,不利于 O_2 的传输从而阻碍了矿化和硝化作用的进行。土壤氮矿化速率和硝化速率均与土壤 pH 呈显著正相关。说明放牧促进土壤氮矿化和硝化作用可能是由于放牧活动改变了土壤 pH 值,而 pH 值增加会促进氮的矿化作用,尤其是对硝化作用影响明显[26],低的 pH 会抑制自养硝化作用的进行,即在偏酸性土壤的环境中硝化作用会比较弱[27-28]。放牧干扰使得沼泽化草甸湿地土壤 pH 增大呈碱性,促进了矿化和硝化作用的进行。而对照地土壤 pH 呈酸性,抑制了矿化和硝化作用的进行。此外,土壤氮矿化速率和硝化速率均与土壤总有机碳、全氮含量呈显著负相关,而与 NH_4^+-N 含量呈极显著负相关。说明放牧干扰对湿地促进土壤氮矿化和硝化作用与放牧活动改变了土壤的总有机碳、全氮、NH_4^+-N 含量有关。

厌氧环境下,土壤氮矿化速率与培养前土壤有机碳含量呈负相关关系[29-30]。本研究中,CK 地土壤含水

率高达 66.31%处于厌氧环境,其矿化速率较受放牧干扰湿地土壤的矿化速率低可能受培养前土壤有机碳含量较高的影响。矿质氮含量也是影响湿地土壤氮矿化速率的重要因素,Kader 的研究表明矿质氮含量与培养期间土壤氮矿化速率呈负相关[29],本研究也发现放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤的氮矿化速率均与土壤的 NH_4^+-N 含量成显著负相关。这说明土壤中存在一个控制氮矿化的反馈机制,即较高的矿质氮初始值限制了土壤氮矿化作用的进行[31-32]。此外,Bianchi 通过对地中海西北部一河口湿地土壤硝化作用的研究表明,有大于 74%的硝化速率差异可由 NH_4^+-N 浓度来解释[33],而硝化作用的 NH_4^+-N 源于矿化作用,所以硝化作用往往受制于湿地土壤的矿化速率。本研究中由于放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤的矿化速率受制于 NH_4^+-N 较高浓度初始值的影响,而硝化作用又受制于矿化速率的影响,进而 NH_4^+-N 较高浓度初始值可能对硝化速率也产生抑制作用。

不同放牧类型对沼泽化草甸湿地土壤的反硝化作用的影响不同,猪的翻拱活动促进了反硝化作用,而牲畜践踏活动抑制了反硝化作用。这是由于猪的翻拱活动增加了土壤的松散度和透气性,更有利于 N_2O 气体的排放,而牲畜践踏活动则使土层压实不利于 N_2O 气体的排放。此外,碳源的输入可以提高反硝化速率[34],本研究中 CK 地土壤的 TOC 含量要明显高于 JT 地,其反硝化速率也高于 JT 地,这可能与 CK 地土壤的 TOC 含量高可以提供源源不断的碳源供应相关。

表 3　放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤氮转化与土壤环境的关系

Table 3　The relationships between nitrogen transformation and environmental factors in soils of swamp meadow wetland with influence of grazing disturbance

类型 Type	指数 Index	容重 Bulk density	含水率 Moisture content	pH	总有机碳 TOC	总氮 TN	氨态氮 NH_4^+-N	硝态氮 NO_3^--N	碳氮比 C:N
矿化速率 Mineralization rate	相关性	0.817**	−0.817**	0.679*	−0.679*	−0.721*	−0.852**	−0.274	0.369
	显著性	0.007	0.007	0.044	0.039	0.028	0.004	0.475	0.328
硝化速率 Nitrifacrion rate	相关性	0.960**	−0.912**	0.779*	−0.757*	−0.742*	−0.911**	−0.109	0.374
	显著性	0.001	0.001	0.013	0.018	0.022	0.001	0.780	0.322
氨化速率 Ammonification rate	相关性	0.028	−0.010	−0.051	−0.051	−0.182	−0.123	−0.550	0.109
	显著性	0.942	0.979	0.897	0.896	0.639	0.753	0.125	0.780
反硝化速率 Denitrification rate	相关性	0.377	−0.291	0.065	−0.841**	0.059	−0.266	0.094	−0.495
	显著性	0.317	0.448	0.869	0.004	0.879	0.558	0.809	0.176

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

4　结论

(1)放牧活动影响了沼泽化草甸湿地土壤的理化性质,牲畜践踏和猪翻拱活动使得沼泽化草甸湿地土壤容重增大,含水率降低,pH 值增大,TOC、TN、TP 含量降低。

(2)放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤的矿化和硝化速率均表现为 ZG > JT > CK,牲畜践踏和猪翻拱均促进了沼泽化草甸湿地土壤的矿化和硝化作用。矿化速率和硝化速率均与土壤容重、pH 呈显著正相关关系,与土壤含水率、TOC、TN、氨氮含量呈显著负相关关系。

(3)放牧干扰下沼泽化草甸湿地土壤的反硝化速率表现为 ZG > CK > JT,表明猪翻拱活动促进了土壤 N_2O 温室气体的排放,而牲畜践踏活动抑制了土壤 N_2O 的排放。反硝化速率与土壤 TOC 含量呈极显著负相关关系。

参考文献(References):

[1] 孙志高, 刘景双, 于君宝. 三江平原不同群落小叶章氮素的累积与分配. 应用生态学报, 2009, 20(2): 277-284.

[2] 李玉霖, 陈静, 崔夺, 王新源, 赵学勇. 不同湿度条件下模拟增温对科尔沁沙质草地土壤氮矿化的影响. 中国沙漠, 2013, 33(6):

1775-1781.

[3] 孙志高，刘景双. 三江平原典型小叶章湿地土壤氮素净矿化与硝化作用. 应用生态学报，2007，18(8)：1771-1777.

[4] Lind L P D，Audet J，Tonderski K，Hoffmann C C. Nitrate removal capacity and nitrous oxide production in soil profiles of nitrogen loaded riparian wetlands inferred by laboratory microcosms. Soil Biology and Biochemistry，2013，60：156-164.

[5] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007：The Physical Science Basis：Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK：Cambridge University Press，2007.

[6] 韩大勇，杨永兴，杨杨，李珂. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式. 生态学报，2011，31(20)：5946-5955.

[7] 何贵永，孙浩智，史小明，齐威，杜国祯. 青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应. 草业学报，2015，24(4)：12-20.

[8] 范桥发，肖德荣，田昆，姚茜，安素帮，余红忠. 不同放牧对滇西北高原典型湿地土壤碳、氮空间分布的差异影响. 土壤通报，2014，45(5)：1151-1156.

[9] Bellinger B J，Jicha T M，Lehto L P，Seifert-Monson L R，Bolgrien D W，Starry M A，Angradi T R，Pearson M S，Elonen C，Hill B H. Sediment nitrification and denitrification in a Lake Superior estuary. Journal of Great Lakes Research，2014，40(2)：392-403.

[10] Mou X J，Sun Z G，Wang L L，Wang C Y. Nitrogen cycle of a typical *Suaeda salsa* marsh ecosystem in the Yellow River estuary. Journal of Environmental Sciences，2011，23(6)：958-967.

[11] 田昆，莫剑锋，陆梅，常凤来，杨永兴. 人为干扰对纳帕海湿地环境影响的研究. 长江流域资源与环境，2004，13(3)：292-295.

[12] 张昆，田昆，吕宪国，佟守正. 纳帕海湖滨草甸湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应. 环境科学，2009，30(8)：2216-2220.

[13] Bonnett S A F，Blackwell M S A，Leah R，Cook V，O'connor M，Maltby E. Temperature response of denitrification rate and greenhouse gas production in agricultural river marginal wetland soils. Geobiology，2013，11(3)：252-267.

[14] Maag M，Vinther F P. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. Applied Soil Ecology，1996，4(1)：5-14.

[15] Keeney D R，Nelson D W. Nitrogen-inorganic forms // Page A L，Miller R H，Keeney D R，eds. Methods of Soil Analysis. Part 2. Madison：American Society of Agronomy，Soil Science Society of America，1982：643-698.

[16] 李香真，陈佐忠. 不同放牧率对草原植物与土壤 C、N、P 含量的影响. 草地学报，1998，6(2)：90-98.

[17] 王向涛. 放牧强度对高寒草甸植被和土壤理化性质的影响[D]. 兰州：兰州大学，2010.

[18] 周丽艳，王明玖，韩国栋. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原群落和土壤理化性质的影响. 干旱区资源与环境，2005，19(7)：182-187.

[19] 仁青吉，崔现亮，赵彬彬. 放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响. 草业学报，2008，17(6)：134-140.

[20] Desjardins T，Andreux F，Volkoff B，Cerri C C. Organic carbon and ^{13}C contents in soils and soil size-fractions，and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. Geoderma，1994，61(1/2)：103-118.

[21] Mekuria W，Veldkamp E，Haile M，Nyssen J，Muys B，Gebrehiwot K. Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray，Ethiopia. Journal of Arid Environments，2007，69(2)：270-284.

[22] 刘楠，张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响. 草业科学，2010，27(4)：11-14.

[23] Yang L L，Zhang F S，Gao Q，Mao R Z，Liu X J. Impact of land-use types on soil nitrogen net mineralization in the sandstorm and water source area of Beijing，China. CATENA，2010，82(1)：15-22.

[24] Haramoto E R，Brainard D C. Strip tillage and oat cover crops increase soil moisture and influence N mineralization patterns in cabbage. HortScience，2012，47(11)：1596-1602.

[25] 张树兰，杨学云，吕殿青，同延安. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响. 生态学报，2002，22(12)：2147-2153.

[26] 田茂洁. 土壤氮素矿化影响因子研究进展. 西华师范大学学报：自然科学版，2004，25(3)：298-303.

[27] Bai J H，Gao H F，Deng W，Yang Z F，Cui B S，Xiao R. Nitrification potential of marsh soils from two natural saline-alkaline wetlands. Biology and Fertility of Soils，2010，46(5)：525-529.

[28] 王玉萍，王立立，李取生，叶妹. 珠江河口湿地沉积物硝化作用强度及影响因素研究. 生态科学，2012，31(3)：330-334.

[29] Kader M A，Sleutel S，Begum S A，Moslehuddin A Z M，De Neve S. Nitrogen mineralization in sub-tropical paddy soils in relation to soil mineralogy，management，pH，carbon，nitrogen and iron contents. European Journal of Soil Science，2013，64(1)：47-57.

[30] 解成杰，郭雪莲，余磊朝，许静. 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征. 生态学报，2013，33(24)：7782-7787.

[31] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京：中国农业出版社，1998.

[32] 孙志高，刘景双，王金达，李新华，杨继松. 湿地生态系统土壤氮素矿化过程研究动态. 土壤通报，2007，38(1)：155-161.

[33] Bianchi M，Feliatra，Lefevre D. Regulation of nitrification in the land-ocean contact area of the Rhône River plume (NW Mediterranean). Aquatic Microbial Ecology，1999，18(3)：301-312.

[34] Lu S L，Hu H Y，Sun Y X，Yang J. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands. Journal of Environmental Sciences，2009，21(8)：1036-1043.